

지반-구조물 상호작용과 교각의 비선형성을 고려한
교량의 지진응답해석
Earthquake Response Analysis of Bridges
with Soil-Structure Interaction and Pier Nonlinearity

이종세 * 최준성 ** 권오신 ***
Lee, Jong-Seh Choi, Jun-Seong Kwon, Oh-Shin

ABSTRACT

With the increasing possibility of earthquake occurrence, seismic safety of bridges has become one of the most important social issues in Korea. In this study, a nonlinear earthquake response analysis is carried out for a real bridge by incorporating soil-structure interaction and pier nonlinearity. The material nonlinearity of the bridge pier is realized by utilizing SAP2000 whereas the soil-structure interaction is analyzed in time domain by adapting KIESSI. The numerical results are compared to those of the models without considering the effects.

1. 서론

지진의 경우 지중에서 발산된 에너지가 지반을 매개로 하여 진원으로부터 지반과 접하는 구조물의 경계에 도달하게 되어 구조물은 진동하기 시작하는 동시에, 구조물의 진동에 의하여 유발된 진동에너지의 일부는 구조물과 지반의 경계면을 통하여 다시 지반에 전달된다(Clough & Penzien, 1993). 이와 같은 지반-구조물 상호작용에 의한 영향을 어떻게 고려하느냐에 따라서 해석결과에 상당한 차이가 있을 수 있다(Wolf, 1985). 그러나 대부분의 엄밀한 지반-구조물 상호작용 해석프로그램은 주파수 영역해만을 제공하여 시간에 따른 물성치의 변화를 고려해야 하는 비선형 응답 해석에는 적합하지 않은 단점이 있다. 최근에는 직접적으로 시간영역에서 엄밀한 지반-구조물 상

* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과, 교수

** 정회원 · 한국유지관리(주), 대표이사

*** 한국유지관리(주), 사원

호작용을 고려한 지진응답해석을 수행할 수 있는 방법들이 연구 중에 있는데 이들 방법들은 계산 시간과 수치해석적인 측면에서 실제 문제에 적용하기에 많은 문제점을 지니고 있다.

교량의 내진 설계와 관련하여 최근에는 지반-구조물 상호작용 문제와 함께 비선형 동적해석 기법의 개발에 대한 관심이 높아지고 있다(김재민 등, 2000; 최준성 등, 2000; 이종세 등, 2002). 특히 철근 콘크리트 구조물인 교각의 경우 강한 지진에 의해 교각하부에서 소성힌지가 빈번히 발생됨을 볼 수 있는데 이러한 구조물의 응답을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 전단력을 받는 기둥의 거동을 효과적으로 모사할 수 있는 비선형 동적해석 기법의 개발이 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 주파수영역상에서 지반-구조물 상호작용 효과를 고려하기 위해 개발된 KIESSI 프로그램을 이용하여 교량에 대한 지반-구조물 상호작용을 고려한 비선형 지진응답해석을 시간영역 상에서 수행하였다. 교각의 재료 비선형을 고려한 비선형 지진응답해석을 수행하기 위하여 SAP2000을 사용한 수치모형을 제안하고 이와 연계된 복합법을 사용하여 비선형 지진응답해석을 수행하였다.

2. 지반-구조물 상호작용의 비선형 시간영역해석을 위한 복합기법

원역지반에서 입사하는 지진입력에 대한 구조물 및 근역지반만의 주파수영역에서 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\overline{U}_s^i(\omega)\} \\ \{\overline{U}_b^i(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_b(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 하첨자 s 는 구조물과 근역지반, b 는 지반의 근역과 원역의 경계면에서 자유도를 나타내고 $[S(\omega)] = [K] + i\omega[C] - \omega^2[M]$ 로서 동적 강성행렬이다. $i = \sqrt{-1}$ 이며 $\{\overline{U}_b^i(\omega)\}$ 는 주파수영역해석에 의한 경계면에서 발생하는 응답이고 $\{\overline{U}_s^i(\omega)\}$ 는 주파수영역에서 원역지반의 선형응답이다. 식(1)에서 $\{P_b(\omega)\}$ 는 $\{P_b(\omega)\} = -[\widehat{S}_{bb}(\omega)](\{\overline{U}_b^i(\omega)\} - \{\overline{U}_s^i(\omega)\})$ 으로 동적상호작용의 영향이 포함된 반력이다. 여기서 $\overline{U}_b^i(\omega)$ 항은 미지항이므로 $\{P_b(\omega)\}$ 항을 분리하여 다시 정리하면 식(2)로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S_{ss}(\omega)] & [S_{sb}(\omega)] \\ [S_{bs}(\omega)] & [S_{bb}(\omega)] + [\widehat{S}_{bb}(\omega)] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\overline{U}_s^i(\omega)\} \\ \{\overline{U}_b^i(\omega)\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{P_{eqk}(\omega)\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$[\widehat{S}_{bb}(\omega)]$ 는 경계면 b 에 대한 원역의 영향을 나타내는 임피던스 행렬이다. 식(2)에서 좌변은 미지항이지만 우변이 기지항들로 이루어져 있기 때문에 쉽게 경계면의 선형응답을 구할 수 있다. 그러나 위 식은 앞에서 나타낸 것처럼 $[S(\omega)]$ 행렬이 질량이나 감쇠, 강성행렬을 다 포함한 형태로 되어있기 때문에 재료적 비선형성을 고려하기는 적합하지 않다. 따라서 위 식을 IFT(Inverse

Fouier Transformation)를 이용해 시간영역의 식으로 바뀌서 적용한다. 임피던스행렬 $[\widetilde{S}_{bb}(\omega)]$ 는 주파수 종속성이 강하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\widetilde{S}_{bb}(\omega)] = [K_{\infty}] + i\omega[C_{\infty}] + [\widetilde{S}_r(\omega)] \quad (3)$$

따라서, $[\widetilde{S}_{bb}(\omega)]\{\overline{U}_b^t(\omega)\}$ 항을 IFT하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} IFT\{[\widetilde{S}_{bb}(\omega)]\{\overline{U}_b^t(\omega)\}\} = \\ [K_{\infty}]\{\overline{u}_b^t(\omega)\} + [C_{\infty}]\{\overline{\dot{u}}_b^t(\omega)\} + \int_0^t [\widetilde{S}_r(t-\tau)]\{\overline{u}_b^t(\omega)\}d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } [\widetilde{S}_r(t)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\widetilde{S}_r(\omega)]e^{i\omega t} d\omega$$

따라서, 시간영역에서 운동방정식을 식(5)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_s^t \\ \ddot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] + [\widetilde{C}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s^t \\ \dot{u}_b^t \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] + [\widetilde{K}_{bb}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s^t \\ u_b^t \end{Bmatrix} \\ + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \int_0^t [\widetilde{S}_r(t-\tau)]\{u_b^t(\tau) d\tau\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ P_{\text{earth}}(t) \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 $[\widetilde{S}_r(t)]$ 행렬이 매우 복잡함으로 알고자 하는 구조물의 응답에 관한 식인 행렬의 첫 행만 사용한다. 첫 행의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$[M_{ss}]\{\ddot{u}_s^t\} + [C_{ss}]\{\dot{u}_s^t\} + [K_{ss}]\{u_s^t\} = -[M_{sb}]\{\ddot{u}_b^t\} - [C_{sb}]\{\dot{u}_b^t\} - [K_{sb}]\{u_b^t\} \quad (6)$$

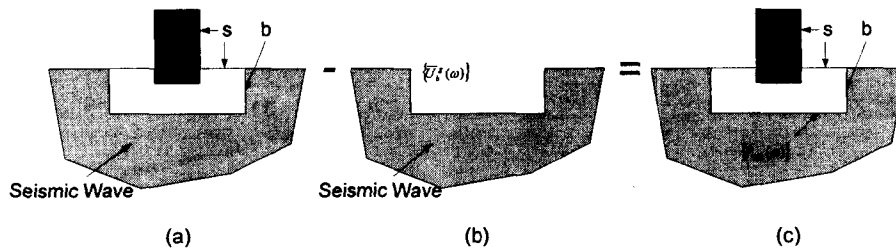


그림 1. 지반-구조물 상호작용계의 지진응답해석 문제

위의 식(6)은 경계면에서 상호작용이 고려된 응답 ($\{\ddot{u}_b^t\}, \{\dot{u}_b^t\}, \{u_b^t\}$)을 주파수 영역에서의 식(1)을 이용해서 구하면 복잡한 문제가 경계조건이 시간에 따라 변하는 통상적인 동적 해석문제로 치환이 가능함을 의미한다.

3. 교량의 비선형 지진응답해석을 위한 교각의 수치모형

교량의 교각비선형을 고려한 동적응답해석을 수행하기 위하여 검증에 사용된 대상교량의 제원과 교각의 비선형 수치모형은 그림 2 및 3과 같다. 교각의 비선형거동을 모사하기 위하여 SAP2000에서 정의하는 NLLINK 요소를 사용하여 해석을 수행하였으며, 이를 단자유도계로 치환하고 수치해석적으로 계산된 교축방향의 변위와 비교하였다. 한편, 콘크리트 교각의 재료 비선형성을 고려하기 위해 사용된 해석모형의 물성치는 표 1과 같다.

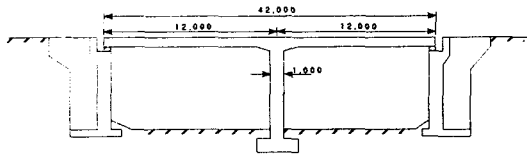


그림 2. 검증대상 교량

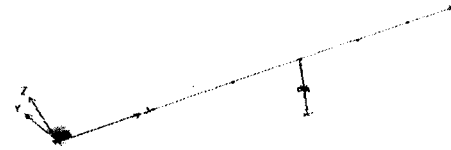


그림 3. 검증대상 교량의 모델링

표 1. 교각의 물성치

항복변위(m)	항복하중(ton)	극한변위(m)	탄성강성 (ton/m)	항복후 강성비
0.0886	250	0.116	2820	0.00

비선형 요소로 모형화한 교량의 해석결과는 먼저 선형 해석에서의 결과와 일치해야 하기 때문에 비선형 요소의 축력, 전단력, 모멘트에 대한 강성값을 시행오차법을 통해 산출하였다. 이때 교량의 교축방향 변위강성은 표 1에서 제시한 물성치를 유한요소해석 프로그램상에 입력하고 해석함으로써 교량의 비선형 거동을 고찰하였으며, 해석에 사용된 지진데이터는 EL-Centro 남북방향 성분의 가속도 시간이력을 사용하였다. 해석결과 이론적인 수치해석적 결과와 SAP2000의 NLLINK 요소를 사용한 결과가 서로 잘 일치하고 있어 본 연구에서 사용된 수치모형의 타당성과 적용성을 알 수 있었으며, 힘과 변위의 이력곡선 역시 표 1에서 보인 비선형 특성값과 서로 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

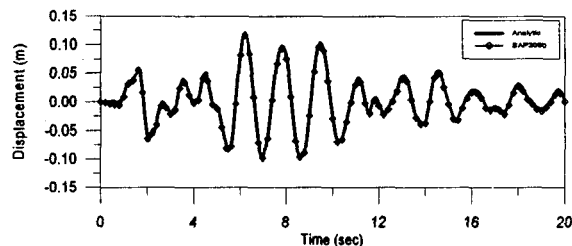


그림 4. 검증대상 교량의 선형거동 비교

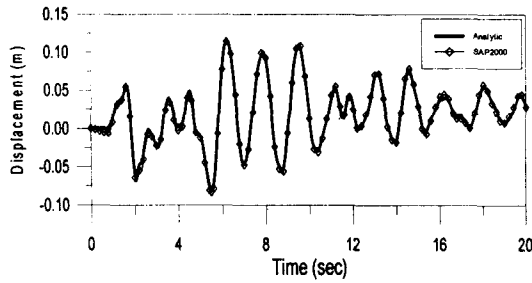


그림 5. 검증대상 교량의 비선형거동 비교

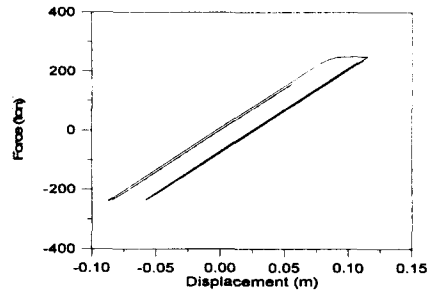


그림 6. 히스테리시스 거동

4. 실제 교량을 이용한 지진응답해석

4.1 해석대상 교량의 모형화

해석대상 교량은 그림 7에 보이는 바와 같이 총지간이 130m이고, 직경 2m의 원형단주 교각으로서 왼쪽 교각은 상부구조와 하부구조가 연결되는 고정단 교각이며 오른쪽 교각은 가동단 조건으로 설정하였다. 지진하중을 받는 콘크리트 교각의 비선형 지진응답해석을 위하여 단면해석을 통해 결정된 그림 8의 모멘트-곡률-곡선을 이용하여 해석을 수행하였다.

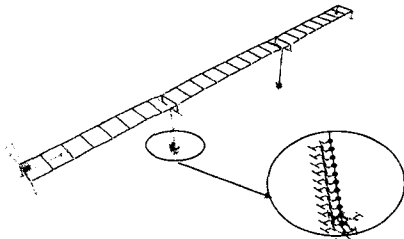


그림 7. 교량기초부의 모형화

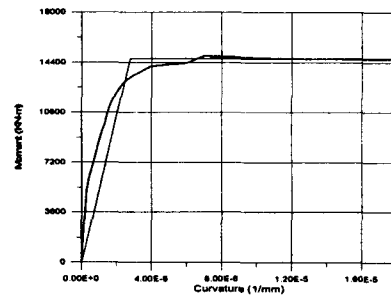


그림 8. 교각의 모멘트-곡률 곡선

지반-구조물 상호작용과 지반의 영향을 고려하기 위해 앞서 언급한 복합법을 사용하였으며 시간영역 상에서 지진응답 해석이 수행되었다. 교각의 기초부분의 해석대상 지반을 모형화(그림 9)하고 이에 사용된 지반 물성과 지반스프링계수를 산정하여 표 2와 표 3에 나타내었다. 또한, 각 절점들에 대해 KIESSI 프로그램을 이용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 지반 변위 시간이력을 구하고 이 값들을 지진하중으로 사용하여 SAP2000으로 모형화된 교량의 교각에 작용시켜 시간이력 해석을 수행하였다. 이때 사용된 지진가속도 시간이력(그림 10)은 S_B 지반에서의 설계응답 스펙트럼으로부터 생성된 인공지진파가 사용되었으며, 최대 지진가속도의 크기는 0.3g으로 변환하여 사용하였다.

표 2. 지반의 동적물성

	지반물성				
	두께(m)	전단파속도(m/sec)	포아송비	감쇠비	비중
Layer1	2.7	200	0.48	0.01	1.7
Layer2	4.2	500	0.48	0.01	1.8
Layer3	3	800	0.48	0.01	1.8
Layer4	∞	1500	0.3	0.01	2.5

표 3. 교각 기초부분의 지반스프링 계수(t/m)

절점번호	스프링계수	절점번호	스프링계수
1	232109.8975	6	283630.2517
2	250978.0615	7	293225.4655
3	261751.9424	8	310378.1772
4	269726.4434	9	980205.7256
5	276608.3392	10	1254001.204

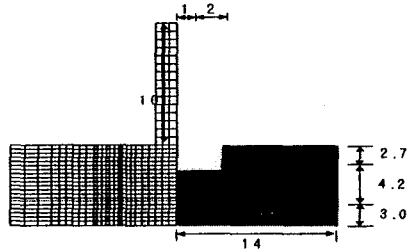


그림 9. 지반의 모형화(m)

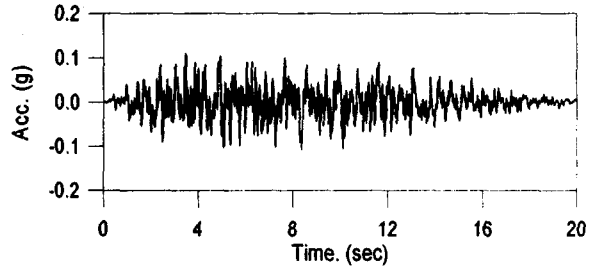


그림 10. 인공지진파의 가속도 데이터

4.2 해석결과 비교

본 연구에서 사용된 모형화 기법을 사용하여 교각의 비선형 거동으로 인한 교량의 비선형 지진 응답을 고찰하기 위하여 교각상부에 발생하는 교축방향에 대한 변위를 비교하여 나타내었다. 그림 11의 결과로부터 알 수 있듯이 교각의 비선형 거동에 따른 교축방향의 변위응답은 선형결과에 비해 다소 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 12는 교각의 비선형 거동을 보여주는 시간이력 곡선으로 상당히 큰 비선형 거동이 발생하였음을 알 수 있고 그림 13에서는 지반-구조물 상호작용

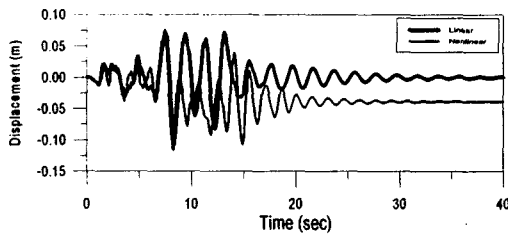


그림 11. 비선형 거동에 따른 변위 비교

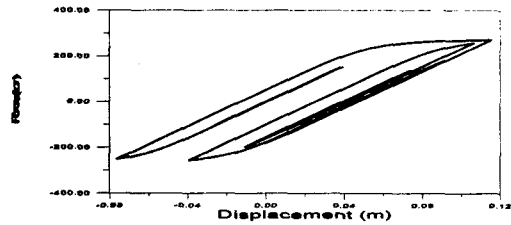


그림 12. R/C 교각의 히스테리시스 곡선

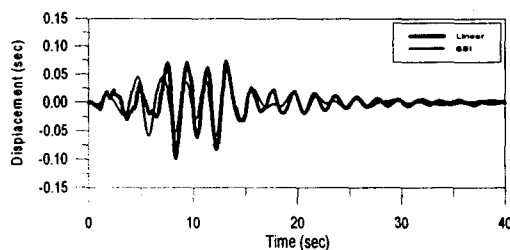


그림 13. SSI 고려유무에 따른 변위 비교

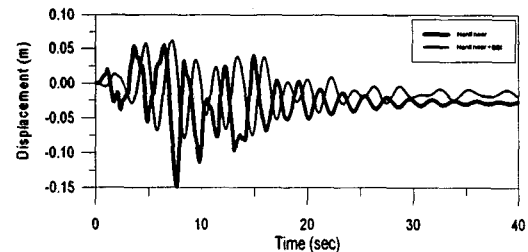


그림 14. SSI와 비선형 거동에 따른 변위 비교

의 영향으로 인해 구조물의 응답이 다소 감소한 것을 볼 수 있다. 그림 14는 교각의 비선형성과 지반-구조물 상호작용이 동시에 고려될 때의 결과이며, 교각의 비선형성만 고려되었을 경우보다 최대 변위값이 더 작게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 지반-구조물 상호작용의 영향으로 인하여 진동에너지가 소산되어 나타난 결과라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 교각의 비선형과 지반의 영향을 함께 고찰하기 위하여 지반-구조물 상호작용의 해석프로그램인 KIESSI를 이용하였으며, 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 이용하여 교각의 재료 비선형을 고려한 해석을 수행하였다. 그 해석결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 교각부의 다른 부가적인 휨 효과를 고려하지 않을 때 본 연구에서 사용된 교각의 재료 비선형성을 고려한 비선형 지진응답해석 결과는 수치해석의 결과와 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 제안된 수치모형이 지진하중을 받는 교량을 해석하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.
2. 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용의 영향이 구조물에 발생하는 부재력을 감소시키는 방향으로 조사되었으며, 교각의 비선형성과 동시에 고려되었을 때도 다소 교각의 거동을 감소시키는 방향으로 조사되었다. 그러나, 지반 종류와 입력지진 및 구조물의 특성에 따라 다른 결과를 초래할 수 있기 때문에 합리적인 내진설계를 위해서는 반드시 지반-구조물 상호작용을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업의 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Penzien, J., "Dynamics of Structures, 2nd edn.", McGraw-Hill, New York, 1993.
2. Wolf, J. P., "Dynamic Soil-Structure Interaction", Prentice-Hall, 1985.
3. 김재민, 최준성, 이종세, "지반-구조물 상호작용의 비선형 시간영역해석을 위한 실용적 복합기법", 한국지진공학회 추계학술발표회 논문집, 2000, pp.132~139.
4. 최준성, 윤정방, 김재민, 이종세, "지반의 비선형성을 고려한 Hualian 대형지진시험구조물의 지진해석", 대한토목학회논문집, 제20권, 제4-A호, 2000, pp.643-657.
5. 이종세, 최준성, 박균익, "콘크리트 지하철 구조물의 비선형 지진응답해석", 대한토목학회논문집 제22권, 제4-A호, 2002, pp.779~788.